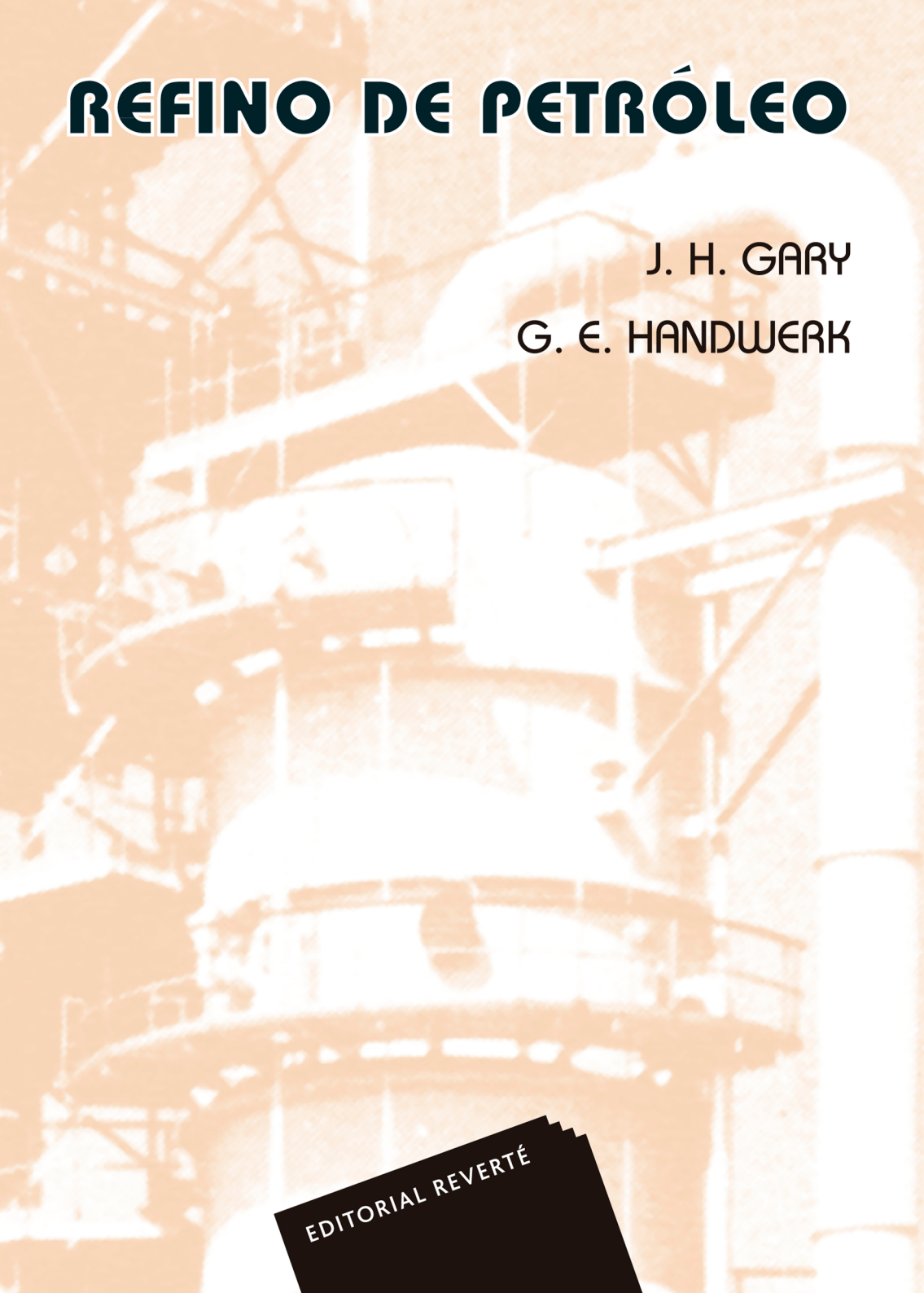


REFINO DE PETRÓLEO



J. H. GARY

G. E. HANDWERK

EDITORIAL REVERTÉ

Refino de petróleo

TECNOLOGÍA Y ECONOMÍA

James H. Gary

Vice President for Academic Affairs
Professor of Chemical and Petroleum Refining Engineering
Colorado School of Mines
Golden, Colorado

Glenn E. Handwerk

Consulting Chemical Engineer
Petroleum Refining and Gas Processing
Golden, Colorado



**EDITORIAL
REVERTÉ**

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Petroleum Refining. Technology and Economics

Edición original en lengua inglesa publicada por:

Marcel Dekker, Inc., New York, U.S.A.

Copyright © by Marcel Dekker, Inc., New York

Versión española por:

Dr. José Costa López

Catedrático de Química Técnica

de la Universidad de Barcelona

D. Claudio Mans Teixidó

Profesor Agregado de Química Técnica

de la Universidad de Barcelona

y

D. Juan Mata Álvarez

Profesor Adjunto de Química Técnica

de la Universidad de Barcelona

Edición en español

© EDITORIAL REVERTÉ, S. A., 1980

Edición en papel:

ISBN 978-84-291-7904-0

Edición e-book (PDF):

ISBN 978-84-291-9202-5

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

Fax: (34) 93 419 51 89

E-mail: reverte@reverte.com

Internet: <http://www.reverte.com>

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Prólogo

La industria de refino del petróleo ha experimentado una expansión y cambio tremendos desde 1950. Aumentos enormes del tamaño de las unidades de proceso, nuevos procesos catalíticos, demandas variables de productos, y nuevas fuentes de petróleo a partir de arenas alquitranadas y pizarras bituminosas han hecho de la tecnología y economía actuales del petróleo una ciencia muy compleja y sofisticada.

Las revistas americanas han relatado estos cambios con sustancial detalle pero, sin embargo, no lo han hecho de una manera sistemática o conveniente para consulta.

Este libro presenta los aspectos básicos de la tecnología y economía corrientes del refino del petróleo de una manera sistemática aconsejable para una consulta fácil por gerentes técnicos, ingenieros prácticos, miembros de facultades universitarias, y graduados o estudiantes superiores de ingeniería química.

Se describen las propiedades físicas y químicas del petróleo y productos del petróleo, junto con los principales procesos de refino moderno. Se presentan datos para determinación de rendimientos de productos, inversiones, y costes de operación para los principales procesos de refino. Se dan también datos similares para procesos auxiliares, tales como generación de hidrógeno y recuperación de azufre elemental. Se describen en términos generales problemas ecológicos de las operaciones de refino del petróleo. Se describe la química de las reacciones en términos básicos con referencia a las condiciones termodinámicas deseables.

Los datos de inversión 1973 se presentan sobre una base con respecto a emplazamiento, servicios, instalaciones exteriores a la zona de proceso, y otros aspectos o conceptos. Se da un procedimiento simplificado para estimar datos razonablemente precisos de inversión y costes de operación.

Se han ampliado los datos de rendimientos de procesos con reacciones químicas para poder efectuar balances completos de materias a partir de propiedades físicas. Tanto

como ha sido posible, los datos para reacciones catalíticas representan rendimientos promedios a partir de catalizadores y procesos patentados competitivos.

Los datos de rendimientos combinados con los datos de costes servirán al ingeniero práctico y dirección de refinería como una herramienta conveniente para el desarrollo de estudios preliminares de posibilidades económicas. Se dan ejemplos de estos cálculos como ayuda a los estudiantes.

El temario está organizado de forma que el curso pueda desarrollarse por el método de estudio de un caso. Facilitando análisis de crudos a los estudiantes, cada estudiante puede proceder a través de las operaciones de refinería a calcular rendimientos, necesidades de servicios, costes de operación y especificaciones de los productos. Un problema ejemplo de estudio de un caso empieza en el capítulo 4 (Destilación de Crudo) y termina en el capítulo 14 (Evaluación Económica).

Se han omitido procesos especiales tales como producción de aceites lubricantes y productos petroleoquímicos, y procesos relativamente obsoletos como craqueo térmico.

Los apéndices contienen datos básicos de ingeniería y un glosario de términos de refinería. A lo largo del libro se indican valiosas referencias bibliográficas.

Los autores han ocupado puestos de responsabilidad en la operación, diseño y evaluación de refinerías, así como en la enseñanza de muchos problemas de refino. El trabajo actual de los mismos se basa fundamentalmente en sus conocimientos directos del refino además de los conocimientos directos de muchos de sus asociados. Los autores agradecen su colaboración a todos aquellos que han contribuido con datos y sugerencias incorporados en este libro. Se agradece también efusivamente el permiso para utilizar información de los trabajos de otros autores. Especialmente útiles resultaron los esfuerzos de D.R. Lohr y V.D. Kliewer de Stearns Rogers Corporation y M.A. Prosche de Atlantic Richfield Company que tomaron parte en los cursos de refino del petróleo en la Colorado School of Mines.

James H. Gary
Glenn E. Handwerk

Índice analítico

Prólogo V

1/INTRODUCCIÓN 1

1.1. Esquema global de una refinería 2

2/PRODUCTOS DE LA REFINERÍA 5

2.1. Productos de bajo punto de ebullición 6

2.2. Gasolina 9

2.3. Especificaciones de la gasolina 11

2.4. Destilados combustibles 12

2.5. Combustibles para reactores 13

2.6. Combustibles para motores diesel de automóviles 14

2.7. Combustibles para locomotoras diesel 15

2.8. Aceites de calefacción 15

2.9. Fuelóleos residuales 16

Bibliografía 16

3/MATERIAS PRIMAS DE UNA REFINERÍA 17

3.1. Propiedades del crudo de petróleo 18

3.2. Composición del petróleo 21

3.3. Crudos adecuados para la fabricación de asfalto 24

3.4. Curvas de destilación de crudos 24

Problemas 31

Bibliografía 32

4/DESTILACIÓN DEL CRUDO	33
4.1. Unidad de cabeza a presión atmosférica	39
4.2. Destilación a vacío	43
4.3. Equipo auxiliar	47
4.4. Productos de la unidad de destilación del crudo	49
4.5. Problema estudio de un caso: unidades de crudo	49
4.6. Planteamiento del problema	50
4.7. Procedimiento general	51
Problemas	54
Bibliografía	55
5/COQUIZACIÓN RETARDADA	57
5.1. Descripción del proceso	58
5.2. Separación del coque	59
5.3. Propiedades y usos del coque de petróleo	60
5.4. Operación	61
5.5. Rendimientos de la coquización retardada	62
5.6. Problema estudio de un caso: Coquizador retardado	65
Problemas	70
Bibliografía	70
6/REFORMADO CATALÍTICO E ISOMERIZACIÓN	71
6.1. Preparación del alimento	76
6.2. Procesos de reformado catalítico	77
6.3. Catalizadores de reformado	80
6.4. Diseño del reactor	80
6.5. Rendimientos y costes	81
6.6. Isomerización	84
6.7. Costes del capital y de operación	85
6.8. Rendimientos de la isomerización y costes	85
6.9. Problema estudio de un caso: hidrogenador de nafta y reformado catalítico	87
Problemas	92
Bibliografía	93
7/CRAQUEO CATALÍTICO	95
7.1. Craqueo catalítico en lecho fluidizado	96
7.2. Craqueo catalítico de lecho móvil	99
7.3. Reacciones de craqueo	104
7.4. Craqueo de parafinas	106
7.5. Craqueo de olefinas	106
7.6. Craqueo de hidrocarburos nafténicos	106
7.7. Craqueo de hidrocarburos aromáticos	107
7.8. Catalizadores de craqueo	107
7.9. Variables de proceso	108

7.10.	Recuperación del calor	110
7.11.	Estimación del rendimiento	110
7.12.	Costes del capital y de operación	119
7.13.	Problema estudio de un caso: craqueador catalítico	119
	Problemas	123
	Bibliografía	124

8/TRATAMIENTO CON HIDRÓGENO 125

8.1.	Catalizadores de tratamiento con hidrógeno	127
8.2.	Reacciones	127
8.3.	Variables de proceso	128
8.4.	Costes de operación y de inmovilizado	129
	Problemas	130
	Bibliografía	131

9/CRAQUEO CATALÍTICO CON HIDRÓGENO 133

9.1.	Reacciones de craqueo con hidrógeno	134
9.2.	Preparación del alimento	137
9.3.	El proceso de craqueo con hidrógeno	137
9.4.	Catalizador de craqueo con hidrógeno	139
9.5.	Procesos de craqueo con hidrógeno en lecho móvil	139
9.6.	Variables del proceso	142
9.7.	Rendimientos del craqueo con hidrógeno	144
9.8.	Inmovilizado y costes de operación	149
9.9.	Problema de estudio de un caso: reactor de craqueo con hidrógeno	152
	Problemas	153
	Bibliografía	153

10/ALQUILACIÓN 155

10.1.	Reacciones de alquilación	155
10.2.	Variables del proceso	157
10.3.	Materias primas de la alquilación	160
10.4.	Productos de la alquilación	160
10.5.	Catalizadores	160
10.6.	Procesos con ácido fluorhídrico	162
10.7.	Procesos de alquilación con ácido sulfúrico	166
10.8.	Comparación de procesos	168
10.9.	Rendimientos y costes de la alquilación	173
10.10.	Problema de estudio de un caso: Alquilación	174
	Problemas	175
	Bibliografía	176

11/MEZCLADO DE PRODUCTOS 177

11.1.	Presión de vapor Reid (PVR, abreviatura inglesa: RVP)	178
11.2.	Mezclado para número de octano	182

11.3.	Mezclado para otras propiedades	183
11.4.	Problema de estudio de un caso: Mezclado de gasolinas	190
	Problemas	193
	Bibliografía	194
12/PROCESOS AUXILIARES 195		
12.1.	Fabricación de hidrógeno	195
12.2.	Unidad de procesado de gas	198
12.3.	Eliminación de gases ácidos	201
12.4.	Procesos de recuperación de azufre	208
12.5.	Consideraciones ecológicas en el refino de petróleo	215
12.6.	Control de la contaminación atmosférica de las refinerías	216
12.7.	Control del nivel de ruido en las refinerías	217
12.8.	Problema de estudio de un caso: Unidad de recuperación de gases, unidad de aminas y unidad de recuperación de azufre	217
12.9.	Problema de estudio de un caso: Unidad de hidrógeno	218
12.10.	Unidad de procesado de gas de refinería	218
12.11.	Unidad de tratamiento de gas con aminas	218
12.12.	Plantas de recuperación de azufre	222
	Problemas	223
	Bibliografía	224
13/ESTIMACIÓN DE COSTES 227		
13.1.	Estimación empírica	227
13.2.	Estimación de curvas de costes	228
13.3.	Estimación de coeficientes de los equipos principales	228
13.4.	Estimación definitiva	229
13.5.	Resumen para la estimación de costes	229
13.6.	Instalaciones de almacenamiento	229
13.7.	Necesidades de terreno y almacenamiento	230
13.8.	Sistemas de producción de vapor de agua	231
13.9.	Sistemas de agua de refrigeración	231
13.10.	Otros servicios generales	231
13.11.	Aplicación de las técnicas de estimación de costes	235
13.12.	Planteamiento del problema	235
	Bibliografía	249
14/EVALUACIÓN ECONÓMICA 251		
14.1.	Definiciones	251
14.2.	Velocidad de recuperación del inmovilizado	253
14.3.	Tiempo de recuperación del inmovilizado	253
14.4.	Rentabilidad intrínseca	253
14.5.	Problema de estudio de un caso: Evaluación económica	258
14.6.	Problema de estudio de un caso: Solución económica	261
	Problemas	264
	Bibliografía	264

APÉNDICES

A/Definiciones de términos de refin	267
B/Propiedades físicas	281
C/Costes de catalizadores	295
D/Análisis de rutina del U.S. Bureau of Mines de crudos de petróleo seleccionados	299
E/Problema ejemplo de evaluación económica	315
F/Fotografías	321
G/Figuras de datos de rendimientos y costes	335
Índice alfabético	389

Capítulo 1

Introducción

Las modernas operaciones de una refinería son muy complejas y, para una persona no familiarizada con la industria, sería una tarea imposible reducir tal complejidad a un conjunto coordinado de procesos comprensibles. El propósito de este libro es presentar los procesos de la refinería, hasta donde sea posible, en el mismo orden en el cual el crudo fluye a través de la refinería, para mostrar los fines y las interrelaciones de las unidades. El método de estudio de casos presentados es el mejor para una rápida comprensión, y se recomienda seleccionar un crudo y efectuar los cálculos de coste y rendimiento en el orden en que se estudian los procesos de refinado. En el capítulo 13 se expone un problema ejemplo para una refinería de poca complejidad.

En la figura 1.1. se muestra el diagrama de flujo del proceso y los productos para una refinería completa de gran complejidad (Véase también foto 1, apéndice F). En términos del volumen de producto, los aceites lubricantes y las grasas representan solamente una pequeña fracción de los productos fabricados y, por consiguiente, no se discuten en este libro. Sin embargo, hacen, que se requieran procesos muy complejos y costosos y son productos de valor muy alto.

El consumo de productos líquidos del petróleo en los Estados Unidos en 1973 estuvo por encima de los 17 millones de barriles por día (BPD). Se esperaba aumentara a 20 millones de BPD hacia 1980. Para hacer frente a esta demanda se requería un aumento del 50% en la capacidad de la refinería en un período de 10 años. Puesto que hay una media de dos a tres años entre el momento en que se toma la decisión de construir una unidad y el momento en el que la unidad está en funcionamiento, se deduce que la mayor parte de esta capacidad adicional tenía que construirse en la segunda mitad de los década de los años 70.

Los impactos al medio ambiente de la preparación y consumo de combustibles requerirán probablemente que tenga lugar un cambio en la distribución de productos (es decir,

menos gasolina y más combustible destilado en términos de porcentaje sobre crudo). Si esto ocurre afectará principalmente a las operaciones de procesamiento de la refinería y dará lugar a una recarga en la construcción de refinerías, adicionándose a la requerida, por el aumento de la producción.

El lenguaje en la industria de refino resulta poco familiar a los que no se encuentran en ella, y para facilitar la entrada a este mundo desconocido, se discutirán las especificaciones de las materias primas y productos con anterioridad a las unidades de proceso de la refinería.

El apéndice A contiene un glosario de términos utilizados en las refinerías que ayudarán a la comprensión de las descripciones. Sin embargo, en muchos casos, no hay definiciones estándar y un mismo término tendrá distinta significación en compañías distintas y aun en distintas refinerías de la misma compañía. Por consiguiente, siempre es importante definir los términos con referencia a escritos o conversaciones concretas.

1.1. Esquema global de una refinería

La figura 1.1. muestra la secuencia de los procesos en una refinería moderna, con indicación de los principales flujos entre las operaciones.

El crudo de petróleo se calienta en un horno y se carga a una columna de destilación que opera a presión atmosférica, donde se separa en: butanos y gas húmedo más ligero, todo el intervalo de gasolinas no estabilizadas, nafta pesada, queroseno, gas-oil pesado y crudo de cabeza. El crudo de cabeza se envía a la torre de vacío y se separa en una corriente superior de gas-oil de vacío y una cola de crudo reducido.

Las colas de crudo reducido procedentes de la columna de vacío se craquean térmicamente en un coquizador retardado para producir gas húmedo, gasolinas coquizadas, gasóleo y coque.

Los gasóleos procedentes de las unidades de crudo atmosférica y a vacío y el gasóleo procedente del coquizador se utilizan como alimentaciones para las unidades de craqueo catalítico o craqueo con hidrógeno. Estas unidades rompen las moléculas pesadas en compuestos que hierven en el intervalo de la gasolina y del destilado combustible. Los productos procedentes del craqueo con hidrógeno son saturados. Los productos insaturados procedentes del craqueo catalítico se saturan y su calidad se mejora mediante reformado catalítico o hidrogenación.

Las corrientes de gasolina de la torre de crudo, del coquizador y de las unidades de craqueo se alimentan a un reformador catalítico, para mejorar sus números de octano. Los productos de reformador catalítico se mezclan para formar gasolinas normales y especiales para la venta.

Las corrientes de gas húmedo de la unidad de crudo, del coquizador y de las unidades de craqueo, se fraccionan en la sección de recuperación de vapor, en gas combustible, gas licuado del petróleo GLP (siglas inglesas LPG), hidrocarburos insaturados (propileno, butilenos y pentenos), butano normal e isobutano. El gas combustible se quema en los hornos de la refinería y el butano normal se mezcla para formar gasolina o GLP. Los hidrocarburos insaturados, y el isobutano se mandan a las unidades de alquilación para su procesamiento.

La unidad de alquilación utiliza ácido sulfúrico o fluorhídrico como catalizador de la

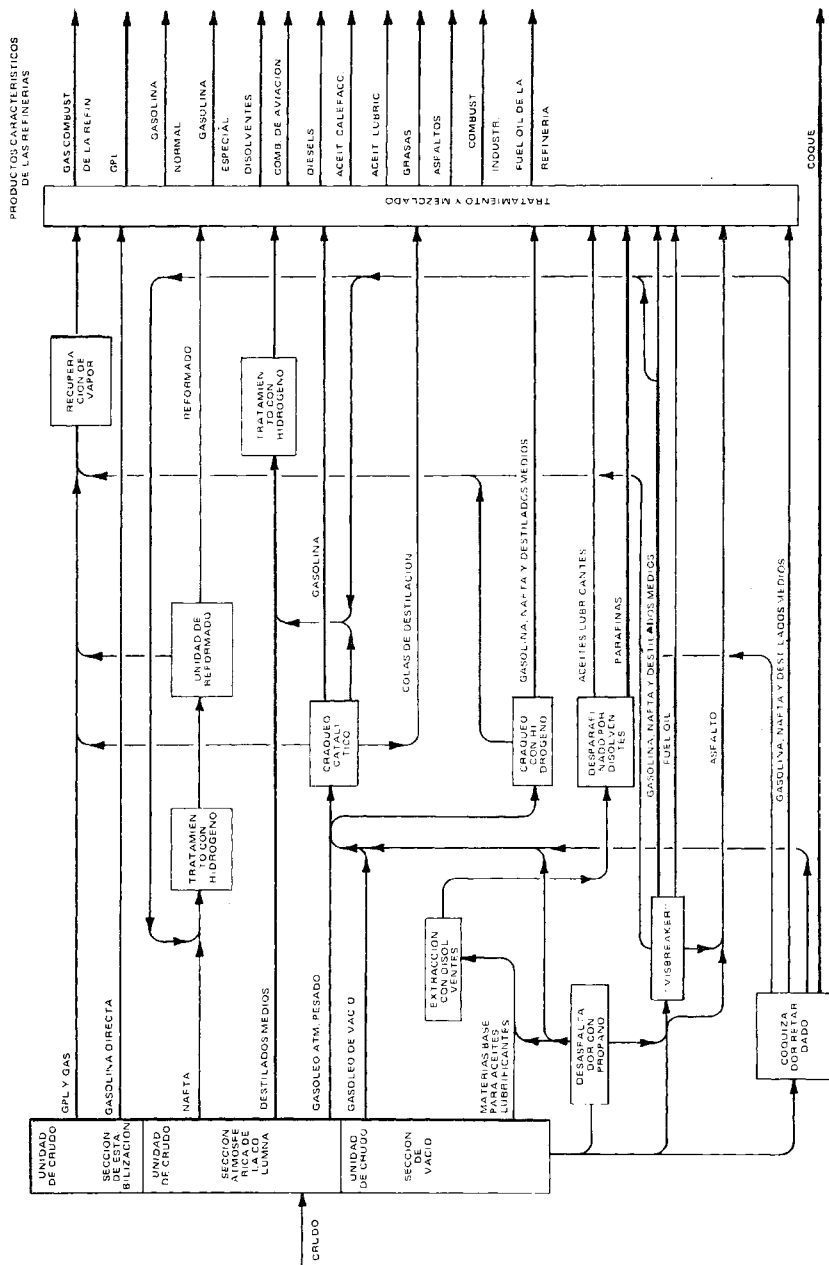


FIG. 1.1. Diagrama de flujo de la refinería

reacción de las olefinas con el isobutano, para formar isoparafinas que hierven en el intervalo de la gasolina. El producto, denominado alquilato, y con un alto contenido en octanos, se mezcla con las gasolinas especiales para automóviles y gasolinas de aviación.

Los destilados medios de la unidad de crudo, del coquizador, y de las unidades de craqueo se mezclan con los combustibles diesel, combustibles para reactores y combustibles para calefacción.

En algunas refinerías, el gasóleo pesado de vacío y el crudo reducido procedente del crudo de base nafténica o parafínica, se procesan para la obtención de aceites lubricantes. Después de eliminados los asfaltenos en el desasfaltador con propano, las colas de crudo reducido se procesan con los gasóleos pesados de vacío en una operación por bloques (etapas) para producir materias base para aceites lubricantes.

Los gasóleos pesados de vacío y desasfaltados obtenidos, se tratan en primer lugar mediante extracción con disolventes, para eliminar los compuestos aromáticos pesados, siendo después desparafinados para mejorar el punto de fluidez. Posteriormente se tratan con arcillas especiales para mejorar su color y estabilidad, antes de ser mezclados para la formación de aceites lubricantes.

Cada refinería posee su propio y único esquema del proceso, el cual está determinado por el equipo disponible, costes de operación y demanda de producto. El modelo óptimo de flujo para una refinería viene dictaminado por consideraciones económicas, y no hay dos refinerías que sean idénticas en sus operaciones.

Capítulo 2

Productos de la refinería

Mientras el consumidor medio tiende a pensar que los productos del petróleo consisten en unos pocos, tales como gasolina, combustible para reactores, queroseno, etc, un estudio de las refinerías de petróleo y plantas petroquímicas realizado por el American Petroleum Institut, (API) reveló que se fabrican por encima de los 2 000 productos, según especificaciones individuales [1]. La tabla 2.1 muestra el número de estos productos individuales agrupados en 17 clases [2].

En general, los productos que impone el diseño de la refinería son relativamente pocos en número, y los procesos básicos de la refinería se basan en productos de gran escala, tales como gasolina, combustible para reactores, y combustible diesel. El almacenamiento y la eliminación de desechos son caros y es necesario vender o utilizar todos los productos del crudo, aun cuando alguno de los materiales, tal como fuel-óleo pesado, deba ser vendido a precios inferiores al del coste del crudo. Para determinar si ciertas fracciones del crudo deben ser vendidas como tales (es decir, como fracciones del primer destilado) o procesarse posteriormente para producir productos con un valor más alto, hay que hacer estudios económicos. En general, el valor más bajo de un hidrocarburo es el valor de su poder calorífico o su equivalente en fuel-óleo (EFO, siglas anglosajonas FOE). Este valor siempre se establece por la localización, demanda, disponibilidad, características de combustión, contenido en azufre, y precios de los combustibles contendientes.

Para comprender la necesidad de los diversos procesos de la refinería es necesario un conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los productos del petróleo. Para proporcionar una representación ordenada de los productos de la refinería, en los siguientes párrafos, se describen en orden de pesos específicos crecientes y volatilidades decrecientes.

La industria del petróleo utiliza un método taquigráfico de nomenclatura de los com-

puestos hidrocarbonados, el cual los caracteriza por el número de átomos de carbono y enlaces no saturados en la molécula. Así, por ejemplo, el propano se representa como C_3 y el propileno como $C_3^=$. Los átomos de hidrógeno correspondientes se supone están presentes a menos que se indique lo contrario. Esta notación se utilizará en todo este libro.

TABLA 2.1

Productos fabricados por la industria del petróleo en EE.UU.

Clase	Número
Gas combustible	1
Gases licuados	13
Gasolina	40
Motor	19
Aviación	9
Otras (tractores, marina, etc.)	12
Combustibles para turbinas de gas (prop. a chorro)	5
Querosenos	10
Destilados (combustibles diesel y fuel-óleos ligeros)	27
Fuelóleos residuales	16
Aceites lubricantes	1 156
Aceites blancos	100
Preventivos de oxidación	65
Aceites para cables y transformadores	12
Grasas	271
Ceras	113
Asfaltos	209
Coques	4
Negros de carbón	5
Productos químicos, disolventes y otros	300
	2 347

2.1 Productos de bajo punto de ebullición

La clasificación en productos de bajo punto de ebullición incluye compuestos que están en fase gaseosa a temperatura ambiente y presión atmosférica: metano, etano, propano, butano y las correspondientes olefinas.

El metano (C_1) se utiliza normalmente como combustible de refinería, pero puede utilizarse como materia prima para la producción de hidrógeno por craqueo pirolítico.

Generalmente se mide en libras¹, en pies cúbicos estándar (siglas anglosajonas scf) a 15,6°C (60°F) y a una presión absoluta de 1 atm., o en barriles EFO (barriles equivalentes de fuelóleo, con el mismo poder calorífico). Las propiedades físicas del metano se exponen en la tabla 2.2.

El etano (C₂) se utiliza como combustible de refinería o como materia prima para producir hidrógeno o etileno, los cuales se utilizan en procesos petroquímicos. En algunas ocasiones el etileno y el hidrógeno se recuperan en la refinería y se venden a plantas petroquímicas.

El propano (C₃) se usa frecuentemente como combustible de refinería, pero también se vende como gas licuado del petróleo (GLP) cuyas propiedades las especifica la

TABLA 2.2
Propiedades físicas de las parafinas

	C _n	Punto de ebullición (°F)	Punto de fusión (°F)	Densidad (60/60° F)	Densidad ° API
Metano	1	-258,7	-296,5	0,30	340
Etano	2	-128,5	-297,9	0,356	265,5
Propano	3	-43,7	-305,8	0,508	147,2
Butano					
normal	4	31,1	-217,1	0,584	110,6
iso	4	10,9	-225,3	0,563	119,8
Octano					
normal	8	258,2	-70,2	0,707	68,7
2, 2, 4	8	210,6	-161,3	0,696	71,8
2, 2, 3, 3	8	223,7	219,0	0,720	65,0
Decano normal	10	345,5	-21,4	0,734	61,2
Cetano, normal	16	555,0	64,0	0,775	51,0
Eicosano normal	20	650,0	98,0	0,782	49,4
Triacontano					
normal	30	850,0	147,0	0,783	49,2
2, 6, 10, 14, 18, 22	30	815,0	-31,0	0,823	40,4

Generalizaciones:

1. El punto de ebullición se eleva con el aumento en el peso molecular.
2. El punto de ebullición de un hidrocarburo de cadena ramificada es inferior al de cadena lineal con el mismo peso molecular.
3. El punto de fusión aumenta con el peso molecular.
4. El punto de fusión de un hidrocarburo de cadena ramificada es inferior al de cadena lineal con el mismo peso molecular, a menos que la ramificación dé lugar a simetrías.
5. La densidad aumenta con el peso molecular.
6. Para propiedades más concretas de parafinas, véase la tabla B.2.

Natural Gas Processors Association (NGPA)[7]. Especificaciones características son una presión manométrica de vapor máxima de 14,29 atm. (210 psig) a 37,8°C (100°F) y un punto de ebullición del 95% de -38,33°C (-37°F), o inferior, a la presión atmosférica de 760 mmHg. En algunas instalaciones se separa el propileno para ser vendido a los fabricantes de polipropileno.

Los butanos presentes en el crudo y los producidos en los procesos de la refinería se utilizan como componentes de la gasolina, y en el procesado de la refinería así como también en el GLP. Debido a que su presión de vapor es inferior a la del isobutano (i-C₄), el butano normal se utiliza preferentemente para la mezcla en gasolinas para regular su presión de vapor y dar lugar a un mejor arranque en tiempo frío. El butano normal tiene una presión de vapor Reid (PVR, siglas anglosajonas RVP) de 3,54 atm, comparado con las 4,83 atm PVR del isobutano, pudiéndose añadir más n-C₄ a las gasolinas sin exceder las especificaciones de la PVR, de la gasolina resultante. Sobre base de volumen la gasolina tiene valores de venta más altos que los del GLP; de esta forma, es preferible mezclar tanto butano normal como sea posible en la gasolina. El butano normal se utiliza asimismo como materia prima de las unidades de isomerización para la formación de isobutano.

TABLA 2.3

Propiedades del propano y butano comerciales

Propiedad	Propano comer.	Butano comer.
Presión de vapor, kg/cm ²		
21°C	8,7	2,2
38°C	13,5	4,1
54°C	20,0	6,8
Densidad específica del líquido 60/60°F	0,509	0,582
Punto de ebullición inicial a 1 atm °C	-46	-9
Punto de rocío a 1 atm °C	-43	-4
Calor específico del líquido a 15°C, kcal/kg °C	0,148	0,138
Calor específico del gas a 15°C kcal/kg °C	0,102	0,096
Límites de ignición, % de gas en el aire		
Límite inferior	2,4	1,9
Límite superior	9,6	8,6
Calor latente de vaporización en el p. de ebullición kcal/kg	103	92
Poderes caloríficos:		
kcal/kg de líquido	11 960	11 170
kcal/m ³ de gas (15°C, 1 atm)	22 796	29 830

El isobutano alcanza su máximo valor cuando se utiliza como materia prima en las unidades de alquilación, donde reacciona con compuestos insaturados (propanos, butanos y pentenos) para formar compuestos de elevado octanaje, que hierven en el inter-

valo de la gasolina. Aunque el isobutano se encuentra en el crudo, su principal fuente de abastecimiento son las unidades de craqueo con hidrógeno y las plantas de procesamiento de gas natural. El isobutano no utilizado como alimento en la unidad de alquilación, puede venderse como GLP o utilizarse como materia prima para la fabricación de propileno. Cuando el butano se vende como GLP debe estar en concordancia con las especificaciones de la NGPA para el butano comercial. Estas incluyen una presión manométrica de vapor de 4,76 atm. (70 psig.) o inferior a 37,8°C (100°F), hirviendo un 95% a una temperatura igual o inferior a 2,2°C (36°F) a la presión atmosférica de 760 mmHg. El butano como GLP posee la desventaja de un punto de ebullición claramente elevado [0°C (32°F) a 760 mmHg] y en invierno no resulta satisfactorio para la calefacción cuando se almacena en el exterior en regiones cuyas temperaturas frecuentemente están por debajo de los 0°C.

Mezclas de butano y propano se venden igualmente como GLP, estando sus propiedades, así como el procedimiento para los ensayos estándar, especificados por la NGPA.

La propiedades medias del propano comercial y del butano se exponen en la tabla 2.3.

2.2 Gasolina

Aunque un examen realizado por el API muestra que las refinerías fabrican unos 40 tipos de gasolinas, un 90% del total de la gasolina producida en los Estados Unidos se utiliza como combustible para automóviles. La mayoría de las refinerías producen gasolina de dos categorías, normal y especial, y además suministran gasolina con su contenido en plomo bajo o nulo, para cumplir con las normas anticontaminación.

La diferencia principal entre los combustibles normales y especiales es su comportamiento antidetonante. En 1973 el número de octano, según el método de investigación del número de octano NOI (siglas anglosajonas RON) fue alrededor de 94 para las gasolinas normales (ver apart. 2.3) y alrededor de 99 para las gasolinas especiales. El número de octano NOI para las gasolinas con un contenido de plomo bajo o nulo, fue alrededor de 91.

El número de octano registrado es la media aritmética entre el número de octano del motor y el de investigación y por término medio es cuatro unidades inferior al NOI.

Las gasolinas son una mezcla compleja de hidrocarburos con un intervalo de ebullición de 100 a 400°F tal como señala el método ASTM. Los componentes se mezclan para proporcionar una elevada calidad antidetonante, un fácil arranque, un rápido calentamiento, una baja tendencia a la formación de bolsas de vapor, y un bajo contenido de depósitos en el motor. Gruse y Stevens [6] dan una amplia relación de propiedades de gasolinas y la forma como éstas vienen influenciadas por los componentes de la mezcla. Sin embargo, para un diseño preliminar de la planta, los componentes utilizados para la mezcla de gasolinas de motor, pueden limitarse a la gasolina ligera del primer destilado, el reformado catalítico, la gasolina craqueada catalíticamente, gasolina hidro-craqueada, el polímero de alquilato y el n-butano.

Aditivos tales como antioxidantes, desactivadores de metal y agentes antiatascantes, no se consideran individualmente ahora, pero se incluyen en el costo de los productos químicos antidetonantes adicionados. La cantidad y el coste de los agentes antidetonantes, si se utilizan, deben determinarse efectuando cálculos de mezclas de octano.

Las gasolinas ligeras directas (siglas anglosajonas LSR) constan de la fracción C₅-190°F de los cortes de nafta del crudo de la columna.

Algunas refinerías cortan a 82°C (180°F) o a 93°C (200°F) en vez de a 88°C (190°F), pero, en cualquier caso, esta es la fracción a la que no se puede materialmente aumentar su grado de octanaje mediante reformado catalítico. Como consecuencia, se procesa separadamente de las fracciones más pesadas de gasolina directa y generalmente requiere solo un lavado cáustico o una ligera hidrogenación, para producir una cantidad de gasolina para mezclado. En algunos casos es necesario estabilizar las gasolinas directas para convertir los mercaptanos residuales en disulfuros para dar un producto dulce (ensayo doctor).

Para un máximo octanaje sin adición de plomo, algunas refinerías han instalado unidades de isomerización para procesar la fracción LSR de gasolina directa ligera.

El reformado catalítico es la gasolina producto C₅⁺ del reformado catalítico. La gasolina directa pesada (siglas anglosajonas HSR) y las gasolinas del coquizador se utilizan como alimento para el reformador catalítico y, cuando las necesidades de octanaje lo requieren, las gasolinas craqueadas catalíticamente y las craqueadas con hidrógeno pueden asimismo ser procesadas por esta unidad para incrementar los niveles de octanaje. Las condiciones de procesamiento del reformador catalítico se controlan para conseguir las propiedades antidetonantes deseadas del producto en el intervalo de 90 a 100 NOI claro (sin plomo).

Las gasolinas del craqueador catalítico o del craqueador con hidrógeno se utilizan directamente como gasolinas de mezclado, pero en algunos casos se aumenta su grado mediante reformado catalítico, antes de mezclarse para formar gasolinas de motor.

La gasolina polímera, se fabrica por polimerización de los hidrocarburos olefínicos para producir parafinas en el intervalo de ebullición de la gasolina. La reciente tecnología de las refinerías favorece más a los procesos de alquilación más que a los de polimerización debido a que se pueden fabricar mayores cantidades de productos de octanaje más alto a partir de las olefinas ligeras disponibles.

La gasolina alquilada es el producto de la reacción del isobutano con el propileno, butileno o pentileno para producir hidrocarburos de cadena ramificada en el intervalo de ebullición de la gasolina. La alquilación de una cantidad dada de olefina, produce dos veces tanto combustible de motor de mayor octanaje como pueda producirse por alquilación. Además el número de octano de mezcla (NOI) del alquilado es mayor y la sensibilidad al plomo más grande que el de la gasolina polímera.

El butano normal se mezcla en la gasolina para dar la presión de vapor deseada. La presión de vapor (expresada como PVR) de la gasolina es un compromiso entre una PVR alta para mejorar las características de arranque y una PVR baja para prevenir la formación de bolsas de vapor y reducir las pérdidas por evaporación. Como tal, cambia con la estación del año, y, sobre el nivel del mar, varía entre 51,71 mm de Hg (10 psi) en verano y 775,7 mm de Hg (15 psi) en invierno. Como el butano tiene un octanaje alto de mezcla, es un componente deseable de la gasolina y las refinerías lo introducen en sus gasolinas tanto como lo permite la limitación en la presión de vapor. El isobutano puede también utilizarse para este fin, pero su mayor presión de vapor permite una cantidad menor para ser incorporada, que el n-butano.

Desde los años 40 la gasolina de motor ha sido el principal producto de las refi-

nerías y, en 1962, la producción de gasolina fue la mayor de cualquiera de las industrias básicas en los Estados Unidos. Las 204 millones de toneladas de gasolina producidas excedieron a las producciones de acero y madera y otros productos de gran volumen [4]. De ésta, más del 90% fue utilizada en turismos y camiones.

El mercado de la gasolina de aviación es relativamente pequeño y se estima solamente alrededor del 3% del mercado de la gasolina. Por esta razón no se considera generalmente en el diseño preliminar de la refinería.

2.3 Especificaciones de la gasolina

Existen varias propiedades importantes de la gasolina, pero las dos que tienen efectos mayores son el intervalo de ebullición y las características antidetonantes.

El intervalo de ebullición de la gasolina determina la facilidad de arranque, la intensidad de la aceleración, las pérdidas por dilución en el cárter y la tendencia hacia la formación de bolsas de vapor. El tiempo de calentamiento del motor viene influenciado por el porcentaje destilado a 158°F y a la temperatura a la cual ha destilado el 90% según ASTM. El calentamiento se expresa en términos de millas de funcionamiento requeridos para desarrollar completamente la potencia sin un uso excesivo del estrangulador. Un calentamiento de dos a cuatro millas se considera satisfactorio y las relaciones entre la temperatura exterior y el porcentaje destilado para unas propiedades de calentamiento aceptables son:

% destilado a 70°C (158°F)	3	11	19	28	38	53
Temp. ambiente mínima °F	80	60	40	20	0	-20

La dilución en el cárter está controlada por la temperatura a la cual ha destilado el 90% según ASTM y es asimismo función de la temperatura exterior. Para mantener la dilución en el cárter dentro de unos límites aceptables, la volatilidad debería ser:

Temp. ambiente mínima, ° F	80	60	40	20	0	-20
Destilación ASTM 90%, °F	370	350	340	325	310	300

La tendencia a la formación de bolsas de vapor está relacionada directamente con la PVR de la gasolina. Para controlar la formación de bolsas de vapor, la presión de vapor de la gasolina no debería exceder los siguientes límites:

Temp. ambiente	PVR max. permisible kg/cm ²
60	0,9
70	0,8
80	0,7
90	0,6

La presión de vapor Reid es aproximadamente la presión de vapor de la gasolina a 38°C (100°F) en libras por pulgada cuadrada absolutas (Designación ASTM: D-323).

La altitud afecta a varias propiedades de la gasolina, la más importante de las cuales es la pérdida por evaporación y la demanda de octanaje. La demanda de número de octano viene afectada grandemente por la altitud y para un avance del encendido constante, es alrededor de tres unidades inferior para cada 304,8 m (1000 pies) de altura. En la práctica, sin embargo, el encendido está generalmente avanzado para alturas importantes, para mejorar el funcionamiento del motor, siendo el efecto neto el reducir el NOI de la gasolina, alrededor de tres unidades para cada 5000 pies de incremento en la altura. La demanda de octanaje varía de 7 a 12 NOI para el mismo modelo de motor debido a las diferencias de puesta a punto, depósitos del motor y falta de ajuste. La tabla 2.4 contiene algunos efectos típicos de variables sobre la demanda de octanaje del motor.

Existen dos tipos de número de octano para los motores de gasolina: los determinados por el "método del motor" (NOM) y los determinados por el "método de investigación" (NOI). Ambos métodos utilizan el mismo ensayo básico del motor, pero operan bajo condiciones distintas. El NOI (ASTM D-908) representa el funcionamiento durante una conducción a baja velocidad, cuando la aceleración es relativamente frecuente, y el NOM (ASTM D-357) es una guía para el funcionamiento del motor a altas velocidades o bajo condiciones de elevada carga. La diferencia entre los números de octano de investigación y del motor de una gasolina es un indicador de los cambios en el funcionamiento bajo ambas conducciones de ciudad y carretera y se conoce como la "sensibilidad del combustible".

TABLA 2.4

Efectos de variables sobre la demanda de octanaje

Variable	Efecto sobre la demanda de octanaje
Altitud	-3 NOI por 1000 pies de incremento en la altitud
Humedad	-0,5 NOI para un incremento del 10% en la humedad rel. a 70°F.
Velocidad del motor	-1 NOI para un incremento de 300 rpm
Temperatura del aire	± 1 NOI por cada 20°F de aumento
Avance del encendido	+ 1,5 NOI por 1° de avance
Temperatura del refrigerante	+ 1 NOI para cada 10°F de aumento
Depósitos en la cámara de combustión	+ 1 a 2 NOI de 1000 a 6000 millas

2.4. Combustibles destilados

Los combustibles destilados pueden dividirse en tres tipos: combustibles para reactores, combustibles (para motores) diesel y aceites de calefacción.

Estos productos se mezclan a partir de diversas corrientes de la refinera para satisfacer las especificaciones deseadas.

El consumo de aceites de calefacción ocupa el segundo lugar después de la gasolina en volumen de productos de la refinería, pero se espera que los combustibles para reactores del tipo queroseno tengan el máximo desarrollo potencial en el futuro.

Esto reflejará la expansión de los viajes aéreos y su cambio hacia aviones mayores y más veloces.

2.5. Combustibles para reactores

El combustible para reactores comerciales es un producto en el intervalo de ebullición del queroseno y cuya combustión debe ser limpia. Las especificaciones ASTM para combustibles para reactores comerciales se exponen en la tabla 2.5. Una de las especificaciones críticas es el punto de humeo, el cual limita el porcentaje de productos craqueados altos en aromáticos que puede ser incorporado. Las especificaciones limitan la concentración de aromáticos al 20%. El craqueo con hidrógeno satura los aromáticos en productos craqueados y aumenta el punto de humeo. La especificación del punto de congelación es muy baja (-40°F max.) y el hidrocrqueo se utiliza también para isomerizar las parafinas y rebajar el punto de congelación. El craqueo con hidrógeno produce normalmente un punto de humeo para el combustible de propulsión a chorro muy bajo (de 14 a 16) cuando se efectúa el craqueo en presencia de una pequeña cantidad de sulfuro de hidrógeno.

TABLA 2.5

Características de los combustibles para aviones a reacción

Propiedad	Tipo A	Tipo B	Tipo A-1
Densidad °API			
Max	51	57	51
Min	39	45	39
Temp. destilación, °F			
Max 10% evap.	400	—	400
Max 50% evap.	450	370	450
Max 90% evap.	—	470	—
Max PEF	550	—	550
Punto de inflamación, °F			
Min	110	—	110
Max	150	—	150
Punto congelación, °F, max	-40	-60	-58
Azufre %, max	0.3	0.3	0.3
Aromáticos, % vol. max.	20	20	20
Olefinas, % vol. max.	—	5	—

El combustible para reactores se mezcla a partir de querosenos desulfurados o con un bajo contenido en azufre, craquedos y con cantidades de gasolina para mezclado craqueada con hidrógeno.

Los dos tipos básicos de combustibles para reactores son la nafta y el queroseno. La nafta para combustible para reactores se produce principalmente para el ejército y constituye un material con un amplio intervalo de ebullición que abarca los intervalos de la gasolina y el queroseno. En caso de emergencia nacional, habría una tremenda demanda de combustible para reactores y para satisfacerla se necesitarían ambas, gasolina y queroseno. El combustible para reactores militares JP-4 es muy similar al combustible ASTM Tipo B, y las especificaciones límite son generalmente el punto de congelación (de -60 a -76°F max.), peso específico (de 45 a 57°API), PVR (2,0 a 3,0 psi) y aromáticos (del 20 al 25% max.). El amplio intervalo de ebullición (del 150 a 550°F) permite una gran flexibilidad en el mezclado, pudiéndose utilizar queroseno, nafta y gasolinas de bajo octanaje.

Las cantidades características de cada componente son:

Componente	Porcentaje en la mezcla	Especificaciones limitantes
Nafta	90-100	Destilación API
Gasolina	25-40	PVR, API
Queroseno	35-45	Punto de congelación

Los combustibles para reactores se mezclan a partir de varios componentes para alcanzar una mezcla de mínimo coste que satisfaga las especificaciones.

Consideraciones de seguridad limitan los combustibles para reactores comerciales a productos con un intervalo de ebullición más estrecho (350 a 550°F) el cual se vende como JP-5 ASTM Tipos A y A-1, o como Jet-50. Las diferencias principales entre estos son los puntos de congelación, los cuales varían de -40 a -58°F como máximo. Además del punto de congelación las especificaciones límite son el punto de inflamación (de 110 a 150°F), destilación, y contenido en aromáticos (20 % como máximo).

2.6. Combustibles para motores diesel de automóviles

Volatilidad, calidad de ignición y viscosidad son las propiedades más importantes de los combustibles de automóviles diesel. El combustible diesel N° 1 (llamado algunas veces super-diesel) se fabrica a partir de reservas vírgenes poseyendo números de cetano por encima de 50. Tiene un intervalo de ebullición de 360 a 600°F y se utiliza en motores muy revolucionados de camiones y autobuses.

El combustible diesel N° 2 es muy similar al fuelóleo N° 2 y posee un intervalo de ebullición más amplio (de 350 a 650°F) que el N° 1. Usualmente contiene algunos materiales craquedos y puede ser mezclado a partir de la nafta, queroseno y aceites cíclicos ligeros craquedos. Las especificaciones limitantes son el punto de inflamación (de 120 a 125°F como mínimo), contenido en azufre (máximo 0,5%) intervalo de destilación, número de cetano (mínimo 52) y un punto de fluidez (máximo de -10 a $+10$).

Las propiedades de ignición de los combustibles diesel se expresan en términos del número de cetano. Este es muy similar al número de octano de la gasolina y expresa el porcentaje en volumen de cetano ($C_{16}H_{34}$ alta calidad de ignición) en una mezcla con alfa-metilnaftaleno ($C_{11}H_{10}$ baja calidad de ignición).

El combustible se utiliza para el funcionamiento de un motor diesel de pruebas estándar de acuerdo con el método de prueba ASTM D-613-62.

2.7. Combustibles para locomotoras diesel

El mayor mercado individual para los combustibles diesel es para motores de locomotoras diesel [5] y, en 1964, este mercado constituyó más de la tercera parte de todas las ventas de combustibles diesel.

Los combustibles diesel para locomotoras son similares a los combustibles diesel más pesados de automóvil, pero poseen intervalos de ebullición más elevados (hasta 700°F de punto final) y números de cetano más bajos (de 40 a 45).

2.8. Aceites de calefacción

Aunque el consumo de productos del petróleo para calefacción ambiental ocuparon el segundo puesto después de la gasolina en 1965, el consumo variaba ampliamente de acuerdo con la localización y el clima. Las especificaciones ASTM para aceites de calefacción se exponen en la tabla 2.6. Los destilados de fuelóleo principales son los fuelóleos N° 1 y N° 2. El fuelóleo N° 1 es muy similar al queroseno, pero posee generalmente el punto de fluidez y el punto final más altos. Las especificaciones límite son la destilación, el punto de fluidez, el punto de inflamación y el contenido en azufre.

TABLA 2.6

Especificaciones de los aceites de calefacción (ASTM D-396-63T)

	N° 1	N° 2	N° 4
Min. punto de inflamación, °F	100	100	130
Max. punto de fluidez, °F	0	20	20
Temp. destilación, °F			
max. evap. 10%	420		
max. evap. 90%	550	640	
min.		540	
Viscosidad, cSt @ 100°F			
max.	2, 2	3, 6	26, 4
min.	1, 4	2, 0	5, 8
Densidad min, °API	35	30	—
Resíduo de carbón sobre			
10% resíduos, % max	0, 15	0, 35	—
Cenizas, % en peso max.	—	—	0, 10

El fuelóleo N° 2 es muy similar al combustible diesel N° 2, contiene materiales craqueados y se mezcla a partir de la nafta, queroseno, diesel y aceites cíclicos craqueados. Las especificaciones límite son el contenido en azufre (de 0,25 al 0,5% como máximo), punto de fluidez (-10 a +5 como máximo) y punto de inflamación (min 120°F).

2.9. Fuelóleos residuales

Más del 60% del fuelóleo residual se importa en los Estados Unidos. Se compone de las partes más pesadas del crudo y está generalmente en los residuos de las columnas de destilación a vacío. Se vende a precios muy bajos (algunas veces a precios inferiores al del crudo a partir del cual se produce) y se considera como un producto secundario. Especificaciones críticas son la viscosidad (110 SSF a 122°F como máximo) y el contenido en azufre (máximo del 1,0%). Esta especificación máxima será rebajada indudablemente dentro de pocos años debido a la regulación de la contaminación atmosférica.

Corrientemente solo pueden ser quemados fuelóleos con un contenido bajo en azufre, en algunas regiones, y esta tendencia se está extendiendo rápidamente. Sobre la costa oeste de EE.UU. el azufre máximo permisible es del 0,5% en peso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Amer. Petrol. Inst. Inform. Bull. N° 11 (Philadelphia, Pa., 1958).
2. W.F. Bland y R.L. Davidson, eds., "Petroleum Processing Handbook" (McGraw-Hill Book Company, New York, 1967), p. 11-1.
3. Ibid, p. 11-10.
4. Ibid, p. 11-12.
5. Ibid, p. 11-39.
6. W.A. Gruse y D.R. Stevens, "Chemical Technology of Petroleum," 3.^a ed. (McGraw-Hill Book Company, New York, 1960). pp. 424-472.
7. "Publication 2140-72, Liquefied Petroleum Gas Specifications and Test Methods" (Natural Gas Processors Assoc., Tulsa, Okla., 1972).

Capítulo 3

Materias primas de una refinería

La materia prima básica para las refinerías es el petróleo o crudo de petróleo, aunque en algunas regiones se incluyen como materias primas de refinería crudos sintéticos procedentes de otras fuentes (Gilsonita, arenas alquitranadas, etc.). Las composiciones químicas de los crudos de petróleo son sorprendentemente uniformes, aunque sus características físicas varían ampliamente. La composición elemental del crudo de petróleo está comprendida normalmente dentro de los siguientes intervalos.

Elementos	% en peso
Carbón	84 - 87
Hidrógeno	11 - 14
Azufre	0 - 2
Nitrógeno	0,2

En los Estados Unidos los crudos de petróleo se clasifican como de base parafínica, base naftalénica, base asfáltica, o base mixta. Existen algunos crudos de petróleo en el Este de los EE.UU. que tienen un contenido en aromáticos superior al 80%, y que se conocen como crudos de base aromática. El U.S. Bureau of Mines [3,5] ha desarrollado un sistema que clasifica al crudo de acuerdo con dos fracciones clave obtenidas en la destilación: N.º 1 de 250 a 275°C a la presión atmosférica y N.º 2 de 275 a 300°C a 40 mmHg de presión. El peso específico de estas dos fracciones se utiliza para clasificar los crudos de petróleo en distintos tipos, tal como sigue:

	Fracciones clave, °API	
	1	2
Parafina	≥ 40	≥ 30
Parafina, intermedio	≥ 40	20 - 30
Intermedio, parafina	33 - 40	≥ 30
Intermedio	33 - 40	20 - 30
Intermedio, nafteno	33 - 40	≤ 20
Nafteno, intermedio	≤ 33	20 - 30
Nafteno	≤ 33	≤ 20

Las clasificaciones parafínica y asfáltica de uso corriente se basan en las propiedades del residuo obtenido con la destilación no destructiva y son más descriptivos para el refinador debido a que expresan la naturaleza de los productos esperados y el procesado necesario.

3.1. Propiedades del crudo de petróleo

El petróleo es muy complejo y, excepto para los componentes de bajo punto de ebullición, el refinador no efectúa ningún intento de análisis para los componentes puros contenidos en el crudo de petróleo. Sobre el crudo se realizan pruebas analíticas relativamente sencillas y los resultados de las mismas se utilizan junto con correlaciones empíricas para la evaluación del crudo de petróleo como materia prima de la refinería en particular. Cada crudo se compara con las otras materias primas disponibles y, basándose en la realización del producto se le asigna un valor. Las propiedades más útiles son:

Densidad, °API.

La densidad de los aceites de petróleo se expresa en términos de densidad API mejor que en términos de peso específico; se relaciona con el peso específico de tal manera que un incremento en la densidad API corresponde a una descenso en el peso específico. Las unidades de densidad API son °API y pueden ser calculados a partir del peso específico mediante la siguiente ecuación:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{(141,5)}{\text{pes. esp.}} - 131,5$$

Ambos, el peso específico y la densidad API, se refieren al peso por unidad de volumen a 60°F. El peso específico de los crudos de petróleo puede variar desde menos de 10°API a más de 50°API pero la mayoría de los crudos se hallan comprendidos en el intervalo de 20 a 45°API.